Research Article

Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research
Vol. 40, No. 4, Page 855-867 (2024)

DOI:10.22092/ijmapr.2024.363273.3363

Energy use pattern and sensitivity analysis of energy inputs for saffron production in Iran

Mohammad Khobbakht[1*], Roohollah Rahimi[2] and Khalil Karimzadeh Asl[3]

1*- Corresponding author, Department of Agricultural Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran, E-mail: gol.m1360@yahoo.com
2- Mechanization Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
3- Medicinal and Aromatic Plants Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: August 2023 Revised: December 2023 Accepted: March 2023

Abstract

Background and objectives: Saffron is one of the most iconic and valuable plants in Iran, with a cultivation history that spans centuries. It is a key agricultural product for export, contributing significantly to the country's foreign currency earnings. As the world's leading saffron producer, Iran accounts for 60% of global production. This study aims to analyze the patterns of energy use in saffron cultivation and explore the relationships between energy inputs and yield in the west of Isfahan province, Iran.

Methodology: This research gathered the necessary data through questionnaires and interviews with saffron farmers. The inputs analyzed in the study included human labor, machinery, diesel fuel, chemical and organic fertilizers, irrigation water, electricity, and seed energy. The energy equivalent for each input was determined by multiplying the input quantities by their respective energy coefficients. Based on the energy equivalents of both inputs and outputs, key energy indices such as energy ratio (energy use efficiency), energy productivity, and specific energy were calculated. The energy ratio (energy use efficiency) was calculated using the formula: Energy Ratio = Energy Output (MJ ha^{-1}) / Energy Input (MJ ha^{-1}). To establish a mathematical relationship between energy inputs and yield, the Cobb-Douglas production function was applied. In this study, energy requirements were categorized into four groups: direct, indirect, renewable, and non-renewable. The marginal physical productivity (MPP) method was employed to analyze the sensitivity of energy inputs in saffron production. This method assesses how the performance changes when one unit of energy input is increased, while holding other production factors constant. A positive MPP value for any input suggests that increasing the input will result in higher output, implying that the input should continue to be used until the resource reaches its limit. Conversely, a negative MPP value indicates that additional units of the input decrease performance, signaling that further input use would be inefficient.

Results: The results of this study revealed that the corm used for cultivation (seed) accounted for the highest proportion of energy consumption in saffron production, contributing 54.11%, followed by manure (13.51%) and electricity (11%). Notably, the proportion of renewable energy in saffron cultivation exceeded that of non-renewable energy consumption. Two

Copyright: © 2024 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijmapr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

methods were employed to calculate energy use efficiency in saffron production: one based on the total outputs, including stigma, leaf, and corm, and the other considering only the saffron stigma. For this study, the energy use efficiency was found to be 0.002 when based solely on saffron stigma. The R^2 value for the Cobb-Douglas production function, which was based on energy consumption, was estimated at 0.84, indicating that the model explained 84% of the variability in performance based on the five input factors: labor, irrigation water, machinery, chemical fertilizers, and animal fertilizers. The results of the Cobb-Douglas model demonstrated that the energy inputs of human labor, machinery, chemical and animal fertilizers, and irrigation water had a significant impact on yield. Furthermore, the sensitivity analysis revealed that human labor had the highest marginal physical productivity (MPP) among all input energies. With an MPP value of 0.87, human labor had the most substantial effect on saffron production, significantly influencing the overall output compared to other energy inputs.

Conclusion: The results of this study indicated that the total energy consumed in saffron production was 138,319 MJ/ha. Of this, renewable energy accounted for 16.46% of the total energy used. The key energy indices for saffron production were as follows: energy use efficiency was 3.7, energy productivity was 0.24 kg MJ^{-1}, specific energy was 4.8 MJ kg^{-1}, and net energy was 377,600 MJ ha^{-1}. These values provide a comprehensive overview of the energy dynamics involved in saffron cultivation, highlighting both the energy intensity and efficiency of the production process.

Keywords: Input, energy, efficiency, saffron.

الگوی مصرف انرژی و تحلیل حساسیت نهادهَای انرژی برای تولید زعفران در ایران

محمد خوب‌بخت[۱*]، روح‌اله رحیمی[۲] و خلیل کریم‌زاده اصل[۳]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، پس الکترونیک: gol.m1360@yahoo.com

۲- استادیار، بخش تحقیقات مکانیزاسیون، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- استادیار، بخش تحقیقات گیاهان دارویی و معطر، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۲ تاریخ اصلاح نهایی: آذر ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: اسفند ۱۴۰۲

چکیده

سابقه و هدف: زعفران، یکی از گیاهان بومی و گران‌قیمت ایران است که کاشت آن سابقه‌ای بسیار قدیمی دارد. این گیاه یکی از گیاهان مهم در صادرات محصولات کشاورزی بوده و نقش مهمی را در ارزآوری برای کشور ایفاء می‌کند. ایران در حال حاضر به‌عنوان بزرگترین تولیدکننده زعفران، حدود ۶۰٪ از کل تولید جهان را به خود اختصاص داده است. هدف از این پژوهش، تعیین الگوی مصرف انرژی و بررسی رابطه بین انرژی ورودی و عملکرد، برای تولید زعفران در غرب استان اصفهان می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق اطلاعات مورد نیاز به‌وسیله پرسش‌نامه و مصاحبه حضوری با کشاورزان جمع‌آوری شد. نهاده‌های مورد بررسی شامل نیروی کارگری، ماشین، سوخت دیزل، کودهای شیمیایی و آلی، آب آبیاری، الکتریسیته و انرژی بذر (پیاز) بودند. معادل انرژی هر یک از نهاده‌ها با ضرب مقدار مصرف نهاده‌ها در هم‌ارز انرژی آن محاسبه شد. براساس معادل‌های انرژی ورودی و خروجی، شاخص‌های انرژی مانند نسبت انرژی (بازده مصرف انرژی)، بهره‌وری انرژی و انرژی ویژه محاسبه گردید. بازده انرژی از تقسیم انرژی خروجی به انرژی ورودی بدست می‌آید. به منظور تعیین رابطه ریاضی بین ورودی‌های انرژی و عملکرد از تابع تولید کاب–داگلاس در این مطالعه استفاده شد. انرژی مورد نیاز در کشاورزی به چهار گروه مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می‌شود. روش بهره‌وری فیزیکی حاشیه‌ای برای تحلیل حساسیت نهاده‌های انرژی ورودی در تولید زعفران استفاده شد. این روش نشان می‌دهد که با افزایش یک واحد در یکی از نهاده‌های انرژی، با ثابت بودن سایر عوامل تولید، میزان تغییر در عملکرد چه میزان است. مقدار مثبت MPP هر نهاده نشان می‌دهد که با افزایش در ورودی، تولید نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین استفاده از متغیر خروجی تا زمانی که منبع ثابت به‌طور کامل استفاده نشده است نباید متوقف شود. مقدار منفی MPP عوامل ورودی نشان‌دهنده این است که هر واحد اضافه ورودی موجب کاهش عملکرد می‌شود.

نتایج: براساس نتایج این تحقیق، پیاز مورد استفاده برای کشت (بذر) (۵۴/۱۱٪) پرمصرف‌ترین نهاده در تولید زعفران می‌باشد و پس از آن کود دامی (۱۳/۵۱٪) و برق (۱۱٪) است. نسبت انرژی‌های تجدیدپذیر در زعفران بیشتر از انرژی‌های تجدیدناپذیر مصرفی بود. دو روش برای محاسبه بازده مصرف انرژی در زعفران وجود دارد: اولی براساس کل خروجی زعفران مانند کلاله، برگ و پیاز است و دومی فقط کلاله زعفران در نظر گرفته می‌شود. به دلیل بازده بسیار پایین کلاله در زعفران، بازده مصرف انرژی در روش دوم نسبت به روش اول بسیار جزئی است. در این مطالعه، بازده مصرف انرژی تنها براساس کلاله زعفران ۰/۰۰۲ بود. مقدار R2 برای مدل کاب–داگلاس براساس مصرف انرژی ۰/۸۴ برآورد شد که نشان می‌دهد این مدل توانایی پیش‌بینی و توضیح ۸۴٪ تغییرات عملکرد توسط ۵ نهاده نیروی کارگری، آب آبیاری، ماشین‌ها، کودهای شیمیایی و حیوانی را دارد. نتایج تابع کاب–داگلاس نشان داد که انرژی ورودی نیروی انسانی، ماشین‌آلات، کودهای شیمیایی و حیوانی و آب برای آبیاری بر عملکرد تأثیر معنی‌داری دارد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که از بین انرژی‌های ورودی، انرژی نیروی انسانی بیشترین مقدار MPP را به خود اختصاص داد. همچنین انرژی نیروی انسانی بیشترین اثر (۰/۸۷) را در مقایسه با سایر منابع در تولید زعفران داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که کل انرژی مصرفی برای تولید محصول زعفران ۱۳۸۳۱۹ مگا ژول در هکتار بدست آمد.

سهم انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید زعفران ۱۶/۴۶٪ بود. بازده مصرف انرژی، بهره‌وری انرژی، انرژی ویژه و انرژی خالص تولید زعفران به‌ترتیب ۳/۷، ۰/۲۴ کیلوگرم بر مگاژول، ۴/۸ کیلوگرم بر مگاژول و ۳۷۷۶۰۰ مگاژول بر هکتار بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: نهاده، انرژی، بازده، زعفران.

مقدمه

امروزه با توجه به افزایش روز افزون جمعیت جهانی، نیاز به تأمین غذای مناسب و کافی از یک سو و حفظ منابع انرژی و آبی از سوی دیگر بسیار اهمیت پیدا کرده است. از آنجایی که بخش کشاورزی، بخش اصلی در تعیین سرنوشت مسائل یاد شده است، ازاین‌رو بررسی مصرف انرژی در این بخش نیز حائز اهمیت می‌باشد. در این مطالعه جریان انرژی نهاده-ستانده در تولید زعفران، همچنین کارایی کشاورزان در منطقه (با استفاده از تکنیک تحلیل پوششی داده‌ها)، رابطه بین انرژی نهاده‌های مصرفی و عملکرد، رابطه بین مقدار فیزیکی نهاده‌ها و محصول در کشت زعفران محاسبه و ارزیابی گردید.

تحلیل الگوی مصرف انرژی از ضرورت‌های مهم در بررسی پروژه‌های کشاورزی است ، با این حال با تحلیل الگوی مصرف انرژی می‌توان با ارائه راهکارهایی برای مصرف بهینه انرژی، از اتلاف بیش از حد آن جلوگیری کرده و در جهت بهبود وضعیت موجود و افزایش سودآوری حرکت نمود (Mousavi-Avval, 2011) به منظور بررسی میزان کارایی مصرف انرژی از روش‌های مختلف بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این روش‌ها می‌توانند راهگشای تحلیل‌های انرژی در کشاورزی باشند. بهینه‌سازی مصرف انرژی از موضوعاتی است که طی آن به بیشترین عملکرد با صرف کمترین مقدار انرژی ورودی توجه شده است (Thankappan *et al*., 2006).

زعفران، یکی از گیاهان بومی و گران قیمت ایران است که کاشت آن سابقه‌ای بسیار قدیمی دارد. این گیاه یکی از گیاهان مهم در صادرات محصولات کشاورزی بوده و نقش مهمی را در ارزآوری برای کشور ایفاء می‌کند. ایران در حال حاضر به‌عنوان بزرگترین تولید کننده زعفران، حدود ۶۰٪ از کل تولید جهان را به خود اختصاص داده است. این محصول در سال اول کاشته می‌شود و به‌طور میانگین تا پایان سال هفتم گل‌های آن هر ساله برداشت می‌شود. از سویی، کشت این گیاه نیز بایستی در راستای نیل به اهداف توسعه پایدار انجام شود و از سوی دیگر بهینه سازی مصرف انرژی در کشت این گیاه می‌تواند منجر به سود اقتصادی بیشتر گردد، زیرا بررسی‌های اولیه، حکایت از شدت مصرف انرژی بالا در کشت این گیاه دارد.

Khanali و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی تراز انرژی محصول زعفران را در یک دوره ۶ ساله بررسی کردند، نتایج نشان داد که به‌طور متوسط کل انرژی ورودی مصرفی ۹۹۲۳۶ مگاژول در هکتار بود و شاخص‌های انرژی یعنی نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی خالص به‌ترتیب ۰/۰۰۴۴، ۰/۰۰۰۳kg MJ^{-1} و ۹۸۸۱۸/۵ $MJ\ ha^{-1}$ بدست آمد. نتایج به وضوح نشان داد که کود نیتروژن، کود دامی و کودهای فسفر به‌ترتیب بیشترین مقدار مصرف انرژی را به خود اختصاص داده بودند.

Sahabi و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی، زعفران و گندم را از نظر انرژی و صرفه اقتصادی در شمال شرق ایران بررسی کردند. نتایج نشان داد که کل انرژی مصرفی در فرایندهای مختلف برای تولید زعفران و گندم به‌ترتیب ۲۱۵۸۰ مگاژول در هکتار و ۳۲۰۶۱/۲۱ مگاژول در هکتار بود. در تولید زعفران، بذر زعفران بیشترین مصرف انرژی (۵۹/۶۶٪) و پس از آن کود نیتروژن (۱۳/۷۹٪) و کود دامی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در گندم، کود نیتروژن (۲۵/۸۹٪) و برق (۱۸/۶۴٪) پرمصرف‌ترین نهاده‌ها بودند. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم زعفران و گندم به‌ترتیب ۷۹/۹۵٪ و ۲۶/۱۹٪ بود. بهره‌وری مصرف انرژی برای زعفران ۰/۰۰۳۵ و برای گندم ۲/۶۳ بود. تولید

زعفران نسبت به گندم کارآمدتر و پایدارتر بود.

Rajabi hamedani و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای به بررسی الگوی مصرف انرژی و الگوی اقتصاد سنجی تولید محصول انگور در استان همدان پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که برای تولید انگور میزان ۴۵۲۱۳/۶۶ مگاژول انرژی در هر هکتار نیاز است. کودهای شیمیایی (۳۷/۲۵٪)، الکتریسیته (۱۹٪) و کود حیوانی (۱۷/۸۴٪) بیشترین سهم از انرژی نهاده‌های ورودی را به خود اختصاص داده‌اند. نسبت انرژی و کارایی انرژی در تولید این محصول به‌ترتیب ۴/۹۵ و ۰/۴۲kg MJ^{-1} بدست آمد. همچنین در این مطالعه از تابع تولیدی کاب-داگلاس برای تخمین یک رابطه بین انرژی‌های ورودی و عملکرد استفاده شد و نتایج نشان داد که تأثیر نهاده‌های سم، کود و آب بر روی محصول تولیدی در سطح ۱٪ معنی‌دار شد.

Mousavi-Avval و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی مصرف انرژی در مزارع کشت سویا در استان گلستان با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها پرداختند. براساس نتایج، متوسط میزان محصول و مصرف انرژی به‌ترتیب ۳۲۳۳/۱۵ کیلوگرم و ۳۵۳۷۲/۲۳ مگاژول بر هکتار بدست آمد. همچنین نتایج تحلیل پوششی داده‌ها نشان داد که کارایی فنی، کارایی فنی خالص و کارایی مقیاس کشاورزان به‌ترتیب ۰/۸۵۳، ۰/۹۱۹ و ۰/۹۲۶ بوده است. علاوه بر این هدف، ذخیره انرژی در کشت سویا ۲۰/۱۲٪ محاسبه شد که میزان ۷۱۱۶/۸۴ مگاژول بر هکتار از انرژی کل را شامل می‌شود، در حالی که عملکرد محصول ثابت بماند.

Pahlavan و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی مصرف انرژی در تولید رز با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها در ایران پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان انرژی کل مصرفی، انرژی کل تولیدی به‌ترتیب ۶۷/۹، ۱۱/۸ گیگاژول بر هکتار و نسبت بازده انرژی ۰/۱۷ بدست آمد. نتایج تحلیل پوششی داده‌ها نشان داد که میانگین کارایی فنی خالص، کارایی فنی و کارایی مقیاس کشاورزان به‌ترتیب ۰/۸۳، ۰/۶۸ و ۰/۷۹ بوده است. نتایج همچنین نشان دادند که با بهینه‌سازی مصرف انرژی کارایی مصرف انرژی می‌تواند به ۰/۳۱ برسد. همچنین می‌توان با استفاده از توصیه‌های این مطالعه، ۴۳/۵۹٪ در مصرف انرژی ورودی صرفه‌جویی کرد.

با توجه به بررسی منابع و تحقیقات انجام شده در زمینه مصرف انرژی در تولید محصولات کشاورزی، مشخص شد که نتایج متفاوتی از نظر مصرف انرژی برای تولید محصولات کشاورزی در نقاط مختلف دنیا حاصل شده است؛ بنابراین لازم است روند مصرف انرژی برای تولید محصولات مختلف هر منطقه بررسی شود تا امکان مقایسه با نتایج مطالعات سایر محصولات منطقه یا حتی تحقیقات انجام شده در سایر کشورها فراهم آید. با توجه به جستجوهای انجام شده مشخص شد که تحقیقات کافی در زمینه مصرف انرژی در تولید محصول زعفران در ایران انجام نشده است. همچنین هیچ مطالعه‌ای در زمینه مصرف انرژی این محصول در استان اصفهان انجام نشده است. بنابراین، در طی یک دوره شش تا هفت سال، بررسی روند مصرف انرژی و شاخص‌های اقتصادی و مقایسه آنها ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

روش‌های جمع‌آوری اطلاعات

اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق از طریق طراحی پرسش‌نامه و مصاحبه با کشاورزان جمع آوری می‌شود . پرسش‌نامه مورد استفاده شامل بخش‌های اصلی زیر است:

اطلاعات مربوط به کشاورزان و مزارع (تجربه، نظام بهره‌برداری، سطح زیرکشت، مالکیت زمین، نحوه تأمین آب آبیاری، روش آبیاری و ...)

اطلاعات مربوط به میزان نهاده‌های مصرفی در هکتار و عملکرد (تعداد کارگر مورد نیاز در مراحل تولید، میزان آبیاری، میزان کودهای شیمیایی، مقدار سموم و کود حیوانی، میزان عملکرد و ...)

اطلاعاتی در مورد عملیات مختلف از خاک‌ورزی تا برداشت و حمل و نقل (نحوه انجام عملیات، مدت زمان

انجام عملیات، تعداد نیروی انسانی استفاده شده، تعداد دفعات انجام عملیات و ...)

اطلاعاتی در زمینه هزینه نهاده‌ها و درآمد (اجاره زمین، هزینه کودها و سموم، هزینه آب آبیاری، هزینه خرید مواد مصرفی و ...)

جریان انرژی در تولید محصولات کشاورزی

نهاده‌های مورد استفاده در تولید محصول زعفران، در منطقه مورد نظر شامل نیروی کارگری، ماشین‌های کشاورزی (تراکتور، گاوآهن، کولتیواتور، سمپاش)، سوخت دیزل، آبیاری، کودهای شیمیایی (نیتروژن، فسفات و پتاسیم) و سموم، کود دامی، بذر و برق می‌باشد. برای تعیین میزان انرژی معادل نهاده‌ها و ستانده‌ها از ضرایب انرژی متناظر با هر یک استفاده شد. ضرایب انرژی برای نهاده‌ها و ستانده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. بنابراین انرژی معادل هر یک از نهاده‌ها از ضرب میزان مصرف هر یک از آنها در ضریب انرژی ویژه آن نهاده بدست می‌آید.

جدول ۱- محتوای انرژی نهاده‌ها و ستانده‌ها در تولید زعفران

Table 1. inputs and output energy content in saffron production

Particulars / Inputs	Equivalent (MJ unit−1)	Ref.
1. Human labor(h)	1.96	(Singh, 2002)
2. Machinery(h)	62.70	(Ozkan *et al.*, 2011)
3. Diesel fuel(lit)	56.31	(Emadi *et al*., 2015)
4. Chemical fertilizers		
(a) Nitrogen (N) (kg)	66.14	(Ozkan *et al*., 2011)
(b) Phosphate (P2O5) (kg)	11.10	(Ozkan *et al*., 2011)
(c) Potassium (K2O) (kg)	11.15	(Ozkan *et al*., 2011)
5. Farmyard manure (kg)	0.30	(Ozkan *et al*., 2011)
6. Micro elements (kg)	120	(Singh & Mittal, 1992)
7. Chemical biocides (lit)	120	(Singh, 2002)
8. Water for irrigation (m^3)	1.02	(Acaroglu, 1998)
9. Electricity (kw)	3.60	(Gundogmus, 2006)
10. Seed (kg)	14.97	(Moayyedi Shahraki *et al*., 2010)
Output		
1. Stigma or seed (kg)	19.80	(Moayyedi Shahraki *et al*., 2010)
2. Straw (kg)	17.40	(Ozkan *et al.*, 2004)
3. Corm (kg)	14.97	(Moayyedi Shahraki *et al*., 2010)
4. Flower (kg)	16.12	(Moayyedi Shahraki *et al*., 2010)

میزان انرژی نهاده‌ها از ضرب کردن ساعات کارکرد نیروی انسانی در معادل انرژی محاسبه می‌شود. براساس رابطه ۱ برای برآورد مقدار انرژی ماشین (مگا ژول بر هکتار)، باید انرژی معادل هر واحد ماشین (مگا ژول بر کیلوگرم) را در جرم ماشین (کیلوگرم) و نیز در ساعات استفاده از ماشین در واحد سطح (ساعت در هکتار) ضرب کرده و در نهایت بر عمر مفید ماشین (برحسب ساعت) تقسیم نمود .

رابطه ۱

$$EM = \frac{E.M.T}{N}$$

که در آن:

EM: انرژی مصرفی ناشی از بکارگیری ماشین بر حسب مگاژول بر هکتار

E: انرژی هر واحد ماشین بر حسب مگاژول بر کیلوگرم

M: جرم ماشین بر حسب کیلوگرم

T: ساعات استفاده از ماشین برحسب ساعت بر هکتار

N: عمر مفید ماشین برحسب ساعت

انرژی کودهای شیمیایی شامل انرژی صرف شده در مراحل تولید، خشک کردن، گرانول کردن، بسته‌بندی، انتقال و کاربرد است. انرژی کودهای دامی براساس میزان ازت، فسفر و پتاسیمی که دارند، در نظر گرفته می‌شود. انرژی مصرفی برای تأمین آب مورد نیاز برای آبیاری در طی فصل رشد، شامل انرژی مستقیم (DE) و انرژی غیر مستقیم (IE) می‌باشد. انرژی مستقیم شامل مصرف انرژی برای بالا آوردن و ایجاد فشار متناسب با نیاز سیستم آبیاری است که از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Kitani, 1999).

رابطه ۲
$$DE = \frac{\rho g H Q}{\eta_1 \eta_2}$$

در این رابطه، DE: انرژی مصرفی مستقیم برحسب ژول در هکتار، ρ: چگالی آب (۱۰۰۰ kg/m3)، g: شتاب جاذبه (۹/۸m/s^2)، H: کل ارتفاع دینامیکی به‌علاوه اُفت اصطکاکی فشار (m)، Q: دبی کل آب مصرفی در فصل زراعی برحسب مترمکعب در ساعت، η_1: بازده پمپ به‌صورت اعشار (تابع ارتفاع عمودی بالابر، سرعت و جریان آب که معمولاً برابر ۰/۷–۰/۹ در نظر گرفته می‌شود) و η_2: بازدهی کل تبدیل انرژی و توان به‌صورت اعشار است که برای پمپ‌های برقی معمولاً برابر ۰/۱۸–۰/۲۰ در نظر گرفته می‌شود. انرژی غیرمستقیم آبیاری شامل انرژی تجهیزات مورد استفاده در عملیات پمپاژ آب، آبیاری و حفر چاه و به‌طور کلی شامل انرژی مواد خام مصرفی و ساخت و انتقال کلیه عواملی که در آبیاری دخالت دارند، می‌باشد که با توجه به طول عمر سیستم محاسبه می‌شود (Kitani, 1999).

شاخص‌های انرژی

مهمترین شاخص‌های انرژی شامل بازدهی مصرف انرژی، بهره‌وری انرژی، انرژی ویژه، خالص انرژی حاصل، شدت انرژی و ارزش شدت انرژی است که با استفاده از رابطه‌های ۳ تا ۶ محاسبه می‌شود (Mohammadshirazi *et al.*, 2012).

رابطه ۳
$$\text{بازده انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی (مگاژول بر هکتار)}}{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}}$$

رابطه ۴
$$\text{بهره‌وری انرژی} = \frac{\text{عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)}}{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}}$$

رابطه ۵
$$\text{خالص انرژی} = \text{انرژی ورودی} - \text{انرژی خروجی}$$

رابطه ۶
$$\text{ارزش شدت انرژی} = \frac{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}}{\text{عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)}}$$

انرژی ورودی به شکل‌های مستقیم و غیرمستقیم و تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر تقسیم‌بندی می‌شوند. انرژی غیرمستقیم شامل کودهای شیمیایی، کودهای حیوانی و ماشین‌ها هستند. در حالی که انرژی مستقیم شامل نیروی انسانی، سوخت دیزل و جریان الکتریسته در فرایند تولید است. انرژی غیرتجدیدپذیر شامل سوخت دیزل، سموم و کودهای شیمیایی، ماشین‌ها و انرژی تجدیدپذیر شامل نیروی انسانی و کود حیوانی می‌باشد.

مدل‌سازی انرژی

به منظور تعیین مدلی برای نشان دادن انرژی خروجی محصول و انرژی مصرفی در کشت زعفران، از تابع تولید کاب-داگلاس استفاده شد. تابع کاب–داگلاس یکی از انواع توابع تولید است که در مطالعات مختلف مربوط به تولید محصولات کشاورزی کاربرد زیادی دارد. یکی از علل استفاده از این نوع تابع، سهولت تفسیر نتایج حاصل است. به کمک این تابع می‌توان به سادگی نوع بازده نسبت به مقیاس، کارایی عوامل تولید و نیز حساسیت جانشینی بین آنها و حساسیت تولید آنها را تعیین کرد. البته این تابع تولید دارای معایبی نیز می‌باشد که از آن جمله می‌توان به ثابت بودن کشش‌های جزئی تولید و ناتوانی این الگو در نشان دادن نواحی مختلف تولید اشاره کرد.

در این پژوهش برای تعیین اثر انرژی‌های ورودی بر عملکرد از مدل کاب–داگلاس استفاده شد. شکل کلی مدل به‌صورت رابطه ۷ می باشد (Nikkhah *et al*., 2014).

رابطه ۷
$$y = F(x)\exp(u)$$

این تابع را می‌توان همچنین به‌صورت زیر (رابطه ۸) نوشت:

رابطه ۸
$$lny_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^{n} \alpha_j \ln(X_{ij}) + e_i \; i = 1,2,\ldots.,53$$

که در آن، y_i بیانگر عملکرد کشاورز i ام، X_{ij} مشخصه ورودی‌های استفاده شده در فرایند تولید، α_j ضرایب رگرسیونی نهاده‌های انرژی ورودی، α_0 و e_i به‌ترتیب ضریب ثابت و ضریب خطا هستند. با فرض اینکه عملکرد یک تابع برحسب انرژی‌های ورودی است و با استفاده از رابطه ۸، رابطه ۹ را می‌توان نوشت.

رابطه ۹
$$lny_i = \alpha_0 + \alpha_1 lnx_1 + \alpha_2 lnx_2 + \alpha_3 lnx_3 + \cdots. + \alpha_7 lnx_7 + e_i$$

که در آن، x_1، x_2، x_3، x_4، x_5، x_6 و x_7 به‌ترتیب نیروی انسانی، ماشین، سوخت دیزل، کود شیمیایی، سم، آب آبیاری و الکتریسته هستند (Shaghozayi & nadi, 2015).

روش بهره‌وری فیزیکی حاشیه‌ای (Marginal physical productivity) MPP برای تحلیل حساسیت نهاده‌های انرژی ورودی در تولید زعفران استفاده شد. این روش نشان می‌دهد که با افزایش یک واحد در یکی از نهاده‌های انرژی، با ثابت بودن سایر عوامل تولید، میزان تغییر در عملکرد چه میزان است. مقدار مثبت MPP هر نهاده نشان می‌دهد که با افزایش در ورودی، تولید نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین استفاده از متغیر خروجی تا زمانی که منبع ثابت به‌طور کامل استفاده نشده است نباید متوقف شود. مقدار منفی MPP عوامل ورودی نشان‌دهنده این است که هر واحد اضافه ورودی موجب کاهش عملکرد می‌شود. MPP از طریق رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

رابطه ۱۰
$$MPP_{xj} = \frac{GM(Y)}{GM(X_{ij})} \times \alpha_{ij}$$

در این رابطه، MPP_{xj} مقدار بهره‌وری فیزیکی حاشیه‌ای به‌ازای نهاده j ام، α_{ij} ضریب رگرسیونی نهاده، $GM(Y)$ میانگین هندسی عملکرد محصول در هکتار و $GM(X_{ij})$ میانگین هندسی نهاده انرژی ورودی است (Royan *et al.*, 2012).

نتایج

نهاده‌های مورد استفاده در زراعت زعفران در غرب استان اصفهان شامل نیروی انسانی (شامل کلیه عملیاتی که برای تهیه زمین، کاشت، داشت و برداشت توسط نیروی انسانی انجام می‌شود)، کود دامی، کودهای شیمیایی، آب و کورم مصرفی می‌باشد. عملیات شخم زمین، نرم و هموار کردن خاک، حمل و پخش کودهای شیمیایی و حیوانی، حمل و کاشت پیازها، ایجاد جوی و نهر برای آبیاری مزارع، عملیات مربوط به آبیاری، برداشت گل و کلاله ها و برداشت کورم در سال آخر با نیروی انسانی انجام می‌شود.

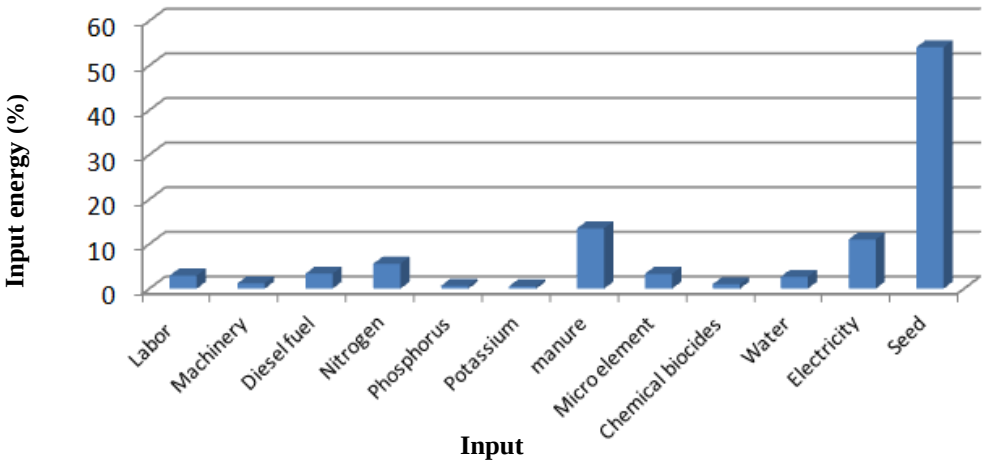
کودها و سموم شیمیایی از مهمترین نهاده‌های کشاورزی هستند که اثر زیادی بر روی عملکرد دارند و بیشتر شامل کودهای نیتروژن و فسفره می‌باشند. به همین دلیل، در این تحقیق به منظور محاسبه انرژی کود شیمیایی (انرژی لازم برای تولید) میانگین مصرف این دو نوع کود در منطقه لحاظ شد.

مقدار متوسط مصرف نهاده‌ها در یک هکتار، در طول دوره رشد و میزان عملکرد محصول، در جدول ۲ ارائه شده است. میانگین مصرف انرژی در مزارع تولید زعفران MJ/ha ۱۳۸۳۱۹ بدست آمد. سهم نهاده‌های مختلف از کل انرژی ورودی در تولید محصول زعفران در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین سهم از کل انرژی نهاده‌ها در تولید زعفران، مربوط به نهاده بذر می‌باشد که بذر زعفران با ۷۴۸۵۰ مگاژول بر هکتار و ۵۴/۱۱٪ کل انرژی ورودی، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. sahabi و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی نیز به این نتیجه رسیدند که انرژی بذر با ۶۰٪ از کل انرژی ورودی، بیشترین سهم را داشت. پس از بذر زعفران، کود حیوانی با ۱۳/۵۱٪ بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص داد. الکتریسیته با حدود ۱۱٪ سومین نهاده انرژی بر در تولید زعفران است.

جدول ۲- مقدار مصرف و میزان انرژی نهاده‌ها و ستانده‌ها در تولید زعفران

Table 2. Consumption and energy amounts of inputs and output in saffron production

Particulars / Inputs	Unit	Quantity (ha^{-1})	Total energy equivalents (MJ ha^{-1})	(%)
Human labor	$h.ha^{-1}$	2080	4076.80	2.95
Machinery	$h.ha^{-1}$	26.80	1680.36	1.21
Diesel fuel	$L.ha^{-1}$	82.39	4639.381	3.35
Chemical fertilizers				
(a) N	$kg.ha^{-1}$	117.21	7752.27	5.6
(b)P_2O_5	$kg.ha^{-1}$	74.442	926.04	0.67
(c)K_2O	$kg.ha^{-1}$	71.16	793.43	0.57
Farmyard manure	$kg.ha^{-1}$	62325	18697.50	13.5
Micro elements	$kg.ha^{-1}$	38.26	4591.20	3.32
Chemical biocides	$Lit.ha^{-1}$	11.62	1394.40	1.01
Water for irrigation	$m^3.ha^{-1}$	3602.30	3674.35	2.66
Electricity	$kWha^{-1}$	4234.27	15243.37	11
Seed	$kg.ha^{-1}$	5000	74850	54.1
Out- put				
Stigma or seed	$kg.ha^{-1}$	14.03	208.80	
Straw	$kg.ha^{-1}$	3000	52200	
Corm	$kg.ha^{-1}$	30000	449100	
Flower	$kg.ha^{-1}$	350	5642	



شکل ۱- سهم نهاده‌های مختلف از کل انرژی ورودی در تولید زعفران

Figure 1. Different inputs share from total input energy in saffron production

بحث

ارزیابی شاخص‌های انرژی

جدول ۳ شاخص‌های نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی، شدت انرژی و افزوده خالص انرژی در تولید زعفران را نشان می‌دهد. دو روش برای محاسبه بازدهی مصرف انرژی زعفران وجود دارد. اولین مورد براساس کل خروجی زعفران که شامل کلاله، برگ و پیاز زعفران است و دومی فقط شامل کلاله زعفران می‌شود. به دلیل عملکرد بسیار کم کلاله در زعفران، بهره‌وری انرژی به روش دوم بسیار ناچیز است. بازده انرژی به روش اول ۳/۷ و روش دوم ۰/۰۰۲ است.

نتایج بررسی‌های انجام شده در منطقه مورد مطالعه نشان داد که متوسط عملکرد زعفران در سال ۱۲/۰۲ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. شدت مصرف انرژی تولید زعفران ۹۸۵۸/۸ مگاژول بر کیلوگرم بدست آمد که نشان می‌دهد به‌ازای تولید هر کیلوگرم زعفران ۹۸۵۸/۸ مگاژول انرژی مصرف می‌شود. بهره‌وری انرژی تولید زعفران برابر با ۰/۰۰۰۱ کیلوگرم بر گیگاژول است که در مقایسه با سایر محصولات کشاورزی مقدار کمتری است. این مورد به دلیل ماهیت تولید زعفران است که مقدار تولید در واحد سطح آن نسبت به سایر محصولات کشاورزی کمتر می‌باشد.

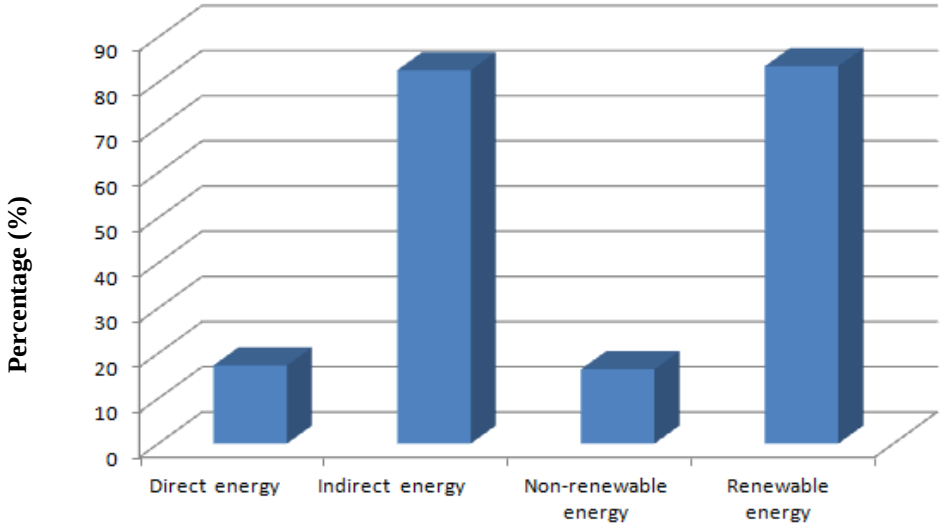
جدول ۳- بازده و شاخص‌های انرژی در تولید زعفران

Table 3. Efficiency and energy indices in saffron production

Items	Unit	Based on stigma	Based on stigma + leaf + corm
Energy use efficiency	-	0.002	3.7
Energy productivity	kg. MJ^{-1}	0.0001	0.24
Specific energy	MJ. kg^{-1}	9858.8	4.08
Net energy	MJ. ha^{-1}	-138041	377600

تقسیم‌بندی انرژی ورودی شامل انرژی مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید زعفران در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تولید این محصول، نسبت انرژی‌های مستقیم بیشتر از انرژی‌های

غیرمستقیم می‌باشد. براساس تحقیقات انجام شده، در تولید برخی از محصولات کشاورزی سهم انرژی‌های غیرمستقیم بیشتر از سهم انرژی‌های مستقیم است (Ozkan *et al.*, 2011). مطالعات دیگری سهم انرژی‌های مستقیم را بیشتر از سهم انرژی‌های غیرمستقیم در تولید محصولات کشاورزی گزارش کرده‌اند (Kizilaslan, 2009). نتایج همچنین نشان می‌دهد که نسبت انرژی‌های تجدیدناپذیر در تولید این محصول، بیشتر از سهم انرژی‌های تجدیدپذیر بوده است که نشان‌دهنده وابستگی تولید محصولات به منابع انرژی فسیلی می‌باشد. نتایج مشابهی در تحقیقات قبلی گزارش شده است (Moore, 2010؛ Ozkan *et al.*, 2011).



شکل ۲- سهم انرژی‌های مستقیم و غیر مستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید زعفران

Fig 2. Share of direct, indirect, renewable and non-renewable energies in saffron production

تحلیل حساسیت نهاده‌های انرژی

به منظور برآورد رابطه بین نهاده‌های انرژی و عملکرد زعفران، از تابع تولید کاب-داگلاس استفاده شد. خودهمبستگی داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، با استفاده از روش دوربین- واتسون آزمایش شد که مقدار آن برای مدل مصرف انرژی تجمعی برابر با ۱/۲۹ بدست آمد و نشان می‌دهد که خودهمبستگی داده‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار است. نتایج رگرسیون برای مدل کاب-داگلاس در جدول ۴ نشان داده شده است. مقدار R^2 برای مدل کاب-داگلاس برآورد شده براساس مصرف انرژی برابر ۰/۸۴ بدست آمد که نشان می‌دهد این مدل توانایی پیش‌بینی و توضیح ۸۴٪ تغییرات عملکرد توسط پنج نهاده نیروی کارگری، آب آبیاری، ماشین‌ها، کودهای شیمیایی و حیوانی را دارد.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در محدوده مورد بررسی در این مطالعه، با افزایش یک مگاژول در انرژی ورودی نهاده‌های نیروی انسانی، کودهای شیمیایی و حیوانی، عناصر کم‌مصرف، سموم شیمیایی، الکتریسیته و بذر عملکرد به‌ترتیب معادل ۰/۵۳، ۰/۲۰، ۰/۳۱، ۰/۰۷۹، ۰/۰۵۱، ۰/۰۵۹ و ۰/۰۶۵ کیلوگرم بر هکتار افزایش یافت و با افزایش یک مگاژول در انرژی نهاده انرژی ماشین‌های کشاورزی، سوخت دیزل و آب آبیاری به‌ترتیب ۰/۲۷، ۰/۰۴۱ و ۰/۲۸ کیلوگرم بر هکتار کاهش یافت. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود

نیروی انسانی، ماشین و آب آبیاری در سطح احتمال ۱٪ و کودهای شیمیایی و حیوانی در سطح احتمال ۵٪ تأثیر معنی‌داری بر روی عملکرد داشتند و انرژی نیروی انسانی بیشترین اثر (۰/۸۳) را در مقایسه با سایر منابع در تولید زعفران داشت.

جدول ۴- اثر انرژی‌های ورودی بر عملکرد و تحلیل حساسیت انرژی مصرفی در تولید زعفران

Table 4. Input energies effects on yield and sensitivity analysis of energy consumption in saffron production.

Particulars	Coefficient	t-Ratio	MPP
Human Labor	0.83	3.41**	0.53
Machinery	-0.44	1.36**	-0.27
Diesel fuel	-0.094	0.52	-0.04
Chemical fertilizers	0.324	2.12*	0.20
Farmyard manure	0.53	2.73*	0.31
Micro elements	0.17	0.92	0.08
Chemical biocides	0.12	0.64	0.05
Water for irrigation	-0.43	-0.43**	-0.28
Electricity	0.12	0.52	0.06
Seed	0.16	0.82	0.06
R^2		0.84	
Durbin–Watson		1.64	
Return to scale		1.29	

* and **: significant at 5 and 1% probability levels, respectively

به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی باید گفت که هدف از این پژوهش، بررسی جریان مصرف انرژی و آنالیز حساسیت تولید زعفران در استان اصفهان می‌باشد. برای بررسی اثر انرژی‌های مصرفی بر عملکرد از تابع کاب-داگلاس و تحلیل حساسیت انرژی‌های مصرفی استفاده شد. مهمترین نتایج این پژوهش به شرح زیر بدست آمد.

کل انرژی نهاده‌ها برای تولید زعفران ۱۳۸۳۱۹ مگاژول در هکتار بود و در بین نهاده‌های مورد نیاز برای تولید محصول زعفران، نهاده بذر زعفران به‌عنوان پرمصرف‌ترین منبع انرژی بود. بازده انرژی برای کلاله زعفران ۰/۰۰۲ بدست آمد.

نسبت انرژی‌های مستقیم بیشتر از انرژی‌های غیرمستقیم بود و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر نسبت به انرژی‌های تجدیدناپذیر برای تولید محصول زعفران بسیار ناچیز بود.

با توجه به تابع کاب-داگلاس، نهاده‌های نیروی انسانی، ماشین، کودهای شیمیایی و حیوانی و آب برای آبیاری تأثیر معنی‌داری بر روی عملکرد داشتند.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که از بین انرژی‌های ورودی، انرژی نیروی انسانی بیشترین مقدار MPP را به خود اختصاص داد. همچنین انرژی نیروی انسانی بیشترین اثر (۰/۸۷) را در مقایسه با سایر منابع در تولید زعفران داشت.

References

- Acaroglu, M., 1998. Energy from biomass, and applications. University of Selc-uk, Graduate School of Natural and Applied Sciences. Textbook (unpublished- Turkish).
- Emadi, B., Nikkhah, A., Khojastehpour, M. and Payman, S.H., 2015. Effect of farm size on energy consumption and input costs of peanut production in Guilan province, Iran. Agricultural Machinery, 5(1): 217-227.
- Gundogmus, E., 2006. Energy use on organic farming: A comparative analysis on organic versus conventional apricot production on small holding in Turkey. Energy Conversion and Management, 47: 3351-335.
- Khanali, M., Movahedi, M., Yousefi, M., Jahangiri, S. and Khoshnevisan, B., 2016. Investigating energy balance and carbon footprint in saffron cultivation e a case study in Iran. Journal of Cleaner Production, 115: 162-171.
- Kitani, O., 1999. CIGR handbook of agricultural engineering, Volume 5: Energy and biomass engineering. ASAE Publications, St Joseph, MI.
- Kizilaslan, H., 2009. Input–output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey. Applied Energy, 86: 1354-1358.
- Moayyedi Shahraki, E., Jami Al-Ahmadi, M. and Behdani, M.A., 2010. Study of energy efficiency of saffron (*Crocus sativus* L.) in Southern Khorasan. Agroecology, 2(1): 55-62.
- Mohammadshirazi, A., Akram, A., Rafiee, S., Mousavi-Avval, S.H. and Bagheri, E., 2012. An analysis of energy use and relation between energy inputs and yield in tangerine production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16: 4515-4521.
- Moore, S.R., 2010. Energy efficiency in small-scale biointensive organic onion production in Pennsylvania, USA. Renewable Agriculture and Food Systems, 25: 181-188.
- Mousavi-Avval, S.H., 2011. Comparison of energy consumption pattern and analysis of mechanization indicators in soybean, rapeseed and sunflower production in Gorgan, Aliabad and Kalaleh cities in Golestan province. Master's Thesis, Agricultural Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran.
- Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A., Mohammadi, A., 2011. Optimization of energy consumption for soybean production using Data Envelopment Analysis (DEA) approach. Applied Energy, 88: 3765-3772.
- Nikkhah, A., Emadi, B., Shabanian, F. and Hamzeh-Kalkenari, H., 2014. Energy sensitivity analysis and greenhouse gas emissions for tea production in guilan province, Iran. Agroecology, 6: 622-633.
- Ozkan, B., Akcaoz, H. and Karadeniz, F., 2004. Energy requirement and economic analysis of citrus production in Turkey. Energy Conversion and Management, 45: 1821-1830.
- Ozkan, B., Ceylan, R.F. and Kizilay, H., 2011. Comparison of energy inputs in glasshouse double crop (fall and summer crops) tomato production. Renewable Energy, 36: 1639-1644.
- Pahlavan, R., Omid, M., Rafiee, S. and Mousavi-Avval, S.H., 2012. Optimization of energy consumption for rose production in Iran. Energy for Sustainable Development, 16: 236-241.
- Rajabi Hamedani, S., Keyhani, A. and Alimardani, R., 2011. Energy use patterns and econometric models of grape production in Hamadan province of Iran. Energy, 36(11): 6345-6351.
- Royan, M., Khojastehpour, M., Emadi, B. and Ghasemi Mobtakr, H., 2012. Investigation of energy inputs for peach production using sensitivity analysis in Iran. Energy Conversion and Management, 64: 441-446.
- Sahabi, H., feizi, H. and karbasi, A., 2016. Is saffron more energy and economic efficient than wheat in crop rotation systems in northeast Iran. Sustainable Production and Consumption, 5: 29-35.
- Shaghozayi, S. and Nadi, F., 2015. Energy modeling of plum production in Golestan province. Iranian journal of Biosystem Engineering, 47: 541-549.
- Singh, J.M., 2002. On farm energy use pattern in different cropping systems in Haryana, India. Germany: Master of Science, International Institute of Management, University of Flensburg.
- Singh, S. and Mittal, J.P., 1992. Energy in production agriculture. Mittal Publications, 213p.
- Thankappan, S., Midmore, P. and Jenkins, T., 2006. Conserving energy in smallholder agriculture: A multi-objective programming case-study of northwest India. Ecological Economics, 56(2): 190-208.